

벤치발파에서 암석 파쇄도에 영향을 미치는 요인 분석 최용근¹⁾, 이정인²⁾, 이정상, 김장순¹⁾

Analysis of Parameters to Influence on Rock Fragmentation in Bench Blasting

Yong-Kun Choi, Chung-In Lee, Jung-Sang Lee and Jang-Soon Kim

ABSTRACT. In bench blasting, rock fragmentation is one of the most important factors determining productivity. Rock fragmentation could be affected by various conditions and these were known that rock joint conditions and in-situ block sizes were the biggest effect on it. This research is focused on what or how to influence on rock fragmentation according to relation between blasting conditions and the in-situ rock conditions such as rock joint conditions and in-situ block size. Field measurements were carried out in 3 open pit limestone mines, where in-situ rock conditions and blasting conditions were fully investigated. The results show that the parameters interact with blasting conditions complicatedly and especially in-situ block size has bigger effects. Dip direction of major joint set also can affect on fragmentation. Mean fragment size become smallest when dip direction of major joint set is about 30° with the bench direction. The reason is considered to be come from difference of propagation paths of elastic wave.

Key words : fragmentation, bench blasting, block size, joint condition

초 록. 암석 파쇄도는 노천의 벤치발파에서 생산성을 좌우하는 요소이다. 벤치발파에서 암석 파쇄도는 여러 가지 조건의 영향을 받게 되는데, 특히 암반의 불연속면 조건과 자연상태 암반 블록의 크기는 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이 연구에서는 석회석을 생산하는 3개 노천광산에서 발파조건 뿐 아니라 암반의 불연속면 조건과 자연상태 암반 블록크기를 면밀히 조사하여 이들 조건이 암석 파쇄도에 미치는 영향을 검토하였다. 분석 결과 암반의 불연속면 조건과 발파조건은 복합적인 상호작용에 의해 영향을 미치는 것으로 밝혀졌으며, 특히 자연상태 암반 블록의 크기는 암석 파쇄도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 암석 파쇄도는 암반의 불연속면 조건 중 주절리군의 방향에 의해서도 영향을 받는 것으로 확인되었는데, 주절리군의 방향이 벤치 앞쪽 자유면과 30°의 경사를 이룰 때 파쇄물의 평균크기가 가장 작게 되는 것으로 나타났다. 이런 현상은 발파로 만들어진 탄성파의 전파경로 차이에 기인하는 것으로 판단된다.

핵심어 : 암석 파쇄도, 벤치발파, 블록크기, 절리조건

1. 서 론

노천발파에서 발파에 의한 암석 파쇄도(Rock Fragmentation)는 운반과 크리싱(Crushing)으로 이어지는 연속 공정에 직접적으로 영향을 미치므로 발파 효율성과 생산의 경제성을 평가하는데 있어서 가장 중요한 요소로 여겨지고 있다(Mononen, 1999).

벤치 발파에서 암석 파쇄도는 암석의 공학적 특성, 발파조건, 불연속면 조건의 영향을 받는다. 암

석의 공학적 특성은 P파 속도, 밀도, 인장과 압축에 대한 동적 강도 등을 포함하며, 발파조건은 폭약의 종류, 발파공간 지연시차, 천공형태, 발파규모, 저항선, 공간격 등의 조건을 가리킨다(Rustan, 1990). 암반의 불연속면 조건은 불연속면의 방향, 크기, 빈도, 절리면 형상, 충전물의 특성 등을 가리키는데, 이들 중 개별 불연속면들의 상호 관계는 자연상태 암반 블록의 크기와 분포를 결정짓게 되므로 발파로 인한 암석 파쇄도에 크게 영향을 미친다(Grenon et al, 1998).

현장에서 비교적 쉽게 얻을 수 있는 암석의 공학적 특성과 발파조건이 암석 파쇄도에 미치는 영향은 여러 차례 조사가 이루어진 반면, 현지암반의 불연속면 조건이 암석 파쇄도에 미치는 영향을 조

1) 서울대학교
2) 지오제니컨설턴트
접수일 : 2004년 9월 13일

사하기 위한 연구는 절리 모사의 어려움과 현장 조사 기법의 한계로 인해 충분히 이루어지지 않은 상태이다.

따라서 이 연구에서는 조사대상 지역 암석의 공학적 특성과 발파조건 뿐 아니라 현지암반의 절리 분포 상태와 자연상태 암반 블록의 크기를 면밀히 조사하여 현지암반 조건이 발파로 인한 암석 파쇄도에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 기존의 연구들이 여러 가지 조건들의 영향을 개별적으로 다룬 반면, 이 연구에서는 개별 조건들의 상호작용을 고려하여 각각의 조건이 암석 파쇄도에 미치는 영향에 대해 검토하였다.

2. 현장조사

2.1 현장 개요

현장조사는 쌍용자원개발의 동해광산, 신기광산과 아시아자원개발의 영월광산 등 3개 석회석 광산에서 이루어졌다(그림 1. 참조). 쌍용자원개발의 동해광산은 3개 채광구역(D1, D2, D3)으로 이루어져 있고, 쌍용자원개발 신기광산은 2개 채광구역(S1, S2)으로, 아시아자원개발의 영월광산은 1개 채광구역(Y1)으로 이루어져 있다.

(1) 동해광산(Donghae Mine)

강원도 동해시 삼화동에 위치한 동해광산 일대의 지질은 선캠브리아기의 태백산편마암복합체를 기저로 하여 고생대 두위봉형 조선누층군의 장산층, 묘봉층, 풍촌층, 삼화층과 이들을 후기에 관입한 시대미상의 삼화화강암으로 구성된다. 동해광산은 풍촌층을 대상으로 하는 석회석 광산이며, 풍촌층은 상부 석회암대, 중부 백운암대, 하부 석회암대로 구분되고 현재는 주로 하부 석회암대를 대상으로 채광이 진행되고 있다.

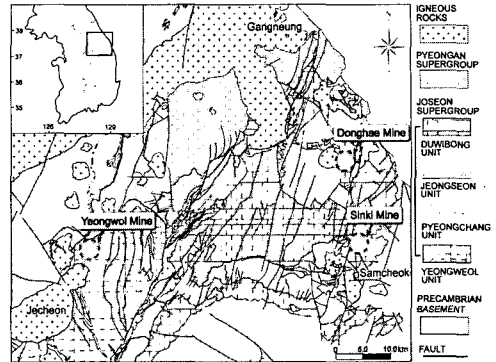


그림 1. 조사가 이루어진 3개 석회석 광산의 위치

(2) 신기 광산(Sinki Mine)

강원도 삼척시 신기면에 위치한 신기광산 일대의 지질은 선캠브리아기의 태백산편마암복합체를 기저로 하여 고생대 두위봉형 조선누층군의 묘봉층, 풍촌층, 화절층, 동점층과 이들을 관입한 소규모의 암맥류로 구성된다. 이 광산 역시 풍촌층의 하부 석회암대를 주 대상으로 하는 석회석 광산이다.

(3) 영월광산(Yeongwol Mine)

강원도 영월군 주천리에 위치한 영월광산 일대의 지질은 고생대 영월형 조선누층군의 삼방산층, 마차리층, 홍월리층으로 구성되며 맥암류가 소규모로 상기 지층을 관입하고 있다. 이 광산은 마차리상부층을 대상으로 하는 석회석 광산으로써 주로 세립의 결정질 석회암으로 구성되어 있으며 얇은 흑색 셰일층이 협재하기도 한다.

2.2 현장조사 결과

조사는 각 광산별 채광구역 단위로 실시되었다. 먼저 각 광산에 대해 지질현황과 절리분포 특성을 조사하였으며, 실내시험으로 암석의 일축압축강도와 밀도 등의 공학적 특성을 조사하였다. 파쇄도 분석을 위한 현장조사는 벤치높이와 저항선, 공간격 등의 발파패턴을 분석하고, 발파 후 쌓여있는 파쇄물을 관찰하여 파쇄입도를 분석하는 순서로 이루어졌다.

(1) 절리군 분석

동해광산의 절리군 분포는 D1, D2, D3 채광구역에서 유사한 특징을 보인다. 이 광산은 석회암층의 중앙부를 화강암이 원형으로 관입하고 있는 형태로써 각 채광구역이 화강암 주변에서 띠 형태로 분포하고 있다. 따라서 절리는 관입한 화강암 주변에서 방사상으로 분포하는 것이 주를 이루며, 이와 수직인 방향 등이 나타난다. 이로 인해 인접해 있는 D1과 D2 채광지역의 절리군 분포는 유사하며, 조금 떨어져 있는 D3는 D1 및 D2와는 다른 특징을 보인다.

습곡과 단층으로 지질분포가 규제되어 있는 신기광산은 중앙부를 가로지르는 남북방향의 단층대에 의해 그 양쪽에 위치해 있는 S1과 S2의 절리군 분포가 다르게 나타난다.

영월광산은 다른 광산에 비해 특정한 방향으로 집중된 형태의 절리분포 특징을 보인다. 조사된 절리의 대부분이 Set-1과 Set-2의 절리군에 속하며, 기타 방향이나 무작위적으로 분포하는 절리가 없는 등 매우 규칙적인 분포상태를 보인다. 각 광산별 절리군 분석 결과는 표 1과 같다.

표 1. 절리군 분석 결과 요약

Site(Mine)	Set-1	Set-2	Set-3
Donghae D1	N28E/85NW	N30W/32NE	N44W/80SW
Donghae D2	N43E/79NW	N8E/29SE	N44W/87SW
Donghae D3	N24E/75SE	N16W/61SW	N5W/30NE
Sinki S1	NS/86E	N88W/64NE	EW/36S
Sinki S2	N64E/84SE	N37W/76SW	N7E/23SE
Yeongwol Y1	N44E/69NW	N43W/74SW	N1W/8SW

(2) 절리 간격과 연장성

일반적으로 어느 부지에서 절리분포 상태와 간격 및 연장성을 통계적으로 분석하는 것은 안정성 해석을 위한 절리망 생성 등에 유용하게 활용되므로 중요한 평가 항목에 해당한다. 그러나 조사가 이루어진 광산의 경우 발파가 이루어지는 벤치 폭이 최대 20~30m를 넘지 않으므로 부지 전체를 대

상으로 조사되어 단일 값으로 평가되는 절리간격과 연장성은 조사대상의 규모에 비해 지나치게 광역적이라고 할 수 있다.

벤치 발파면 같이 대상 부지가 극히 좁은 경우에는 부지 전체에 대한 통계적 절리특성 보다는 벤치면에 노출되어 있는 절리면의 결정론적 특성에 근거하여 발파결과가 달라질 것으로 판단된다. 즉 조사지역 전체의 절리분포 상태를 표현하는 각종 통계값들은 매회 발파되는 벤치면의 절리간격이나 블록크기 분포에 대한 특성을 적절하게 반영할 수 없으므로, 해당 벤치에서 직접 측정된 절리간격과 블록크기가 더 정확한 설명력을 가진다고 할 수 있다.

이 연구에서는 절리군의 방향과 달리 벤치 위치에 따라 크게 차이나는 절리간격과 연장성에 대해서는 대상 부지의 전체적인 특성만을 파악하기 위해 Set-1에 속하는 절리들에 대해서만 조사를 실시하였다. 각 지역별로 Set-1에 속하는 절리군의 간격과 길이 분포는 그림 2와 같다.

절리간격 분포는 전체적으로 Lognormal 분포가 잘 맞는다. 신기광산 S2의 절리간격이 평균 20~30cm로 가장 좁으며, 최대간격도 90cm 내외로 전체 조사지역에서 가장 작은 값을 보인다. 반면 영월광산(Y1)의 경우는 평균간격이 60~70cm 내외로써 타 지역에 비해 비교적 넓게 나타났으며, 일정한 간격으로 나타나는 것을 알 수 있다. 동해광산의 D1, D2 및 신기광산의 S1은 절리간격이 50~60cm 내외로써 유사한 특징을 보인다. 동해광산의 D3는 절리간격이 평균 120cm로써 전체 조사지역 중 가장 넓은 절리간격 분포를 보이지만, 20cm 이내의 절리 또한 다수 분포하는 특징을 보인다.

절리길이 분포는 간격 분포에 비해 불규칙한 형태를 보인다. 동해광산의 D2는 수직에 가까운 경사를 가진 주절리군이 벤치 전체를 관통하는 연장성을 갖는 것으로 나타났으며, 그 빈도수도 월등히 높게 나타났다. 주절리군의 길이가 벤치 전체를 관통하는 경우는 신기광산의 S1과 영월광산(Y1)에서도 나타난다. 적합한 분포곡선의 형태는 지역에 따라서 다르다. 절리길이는 영월광산(Y1)이 6~10m

사이에 분포하여 타 지역에 비해 비교적 긴 편이다. 다른 지역의 절리길이는 평균 3~5m 정도에 해당되나 벤치를 관통할 정도의 긴 절리가 있을 뿐만 아니라 2~4m 내외의 길이를 갖는 절리도 다수 분포하고 있는 특징이 있다.

(3) 암석의 공학적 특성

조사 지역 암석의 공학적 특성을 파악하기 위해 일축압축강도와 인장강도 및 기초적인 물성시험을 실시하였으며, 암편들을 이용한 점하중 시험을 실시하였다. 일축압축강도와 물성시험을 위한 시료는 각 발파지역에서 암석 블록을 채취하고 이로부터 얻어진 코어(NX-Size)를 이용하였다.

점하중 시험은 각 발파가 이루어진 벤치 주변에서 암편을 채취하여, 불규칙 형태의 시료를 이용한 시험(Irregular Lump Test)을 30회씩 실시하였다. 표 2에는 시험결과를 각 광산의 채광지역별로 평균하여 표시하였다. 이 결과 서로 인접해 있는 동해광산의 D1, D2, D3에서 일축압축강도와 인장강도 및 탄성계수가 유사한 값으로 나타났다. 신기광산의 S1과 S2는 서로 인접해서 위치하고 있으나, 일축압축강도를 제외한 대부분의 물성이 서로 차이를 보였다. S1과 S2의 서로 상이한 특징은 각 구역이 단층으로 분리되어 있으며, 지질적으로 서로 다른 특징을 보이기 때문이다.

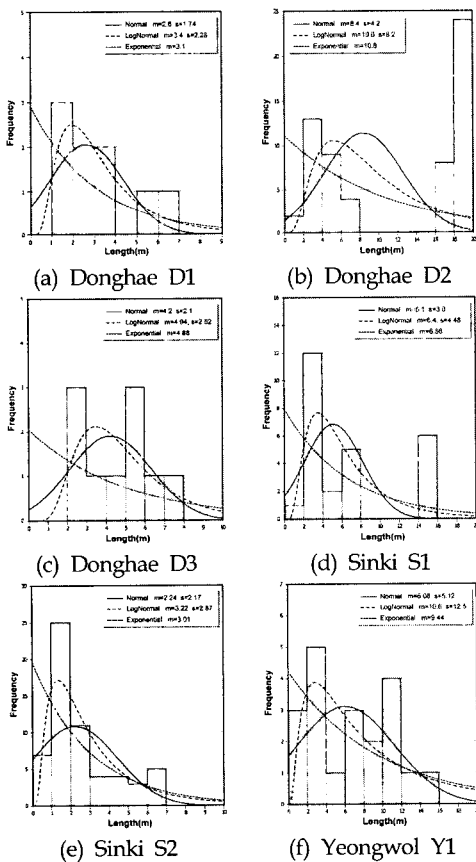


그림 2. 각 지역별 Set-1 절리군의 길이 분포

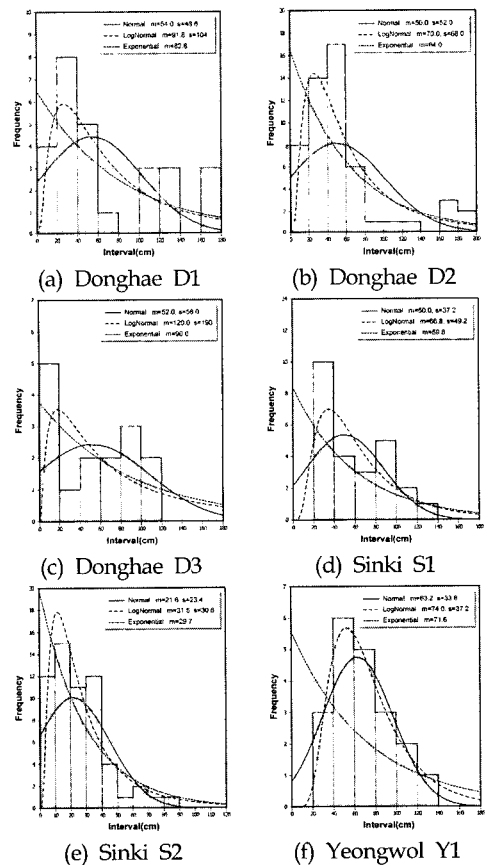


그림 3. 각 지역별 Set-1 절리군의 간격 분포

표 3. 암석의 일축압축강도와 공학적 특성

Site (Mine)	UCS (kg/cm ²)	Tensile Strength (kg/cm ²)	Young's Modulus (10 ⁵ kg/cm ²)	Vp (m/s)
D1	690	74	9.54	5000
D2	810	69	4.25	3210
D3	730	65	5.66	3180
S1	1170	240	12.79	5650
S2	1180	116	10.29	6440
Y1	1820	130	5.14	6090

(4) 발파조건

6개 지역에서 총 31회의 발파결과가 조사되었다. 조사는 석회석 광석을 얻기 위한 정규 수직발파(Production Blasting)에서만 이루어졌으며, 기타 수평발파나 폐석에 대한 발파 및 단층이 자유면에 노출되어 있는 경우는 조사대상에서 제외되었다. 조사된 모든 광산에서 벤치 높이는 12~15m로 유사하다. 저항선과 공간격도 대략 3.5m×3.5m 내외에서 유사하며, 1m의 Sub-Drilling에 전색 높이 3~4m를 적용하는 등 광산에 따라서 큰 차이를 보이지 않는다. 다만 영월광산(Y1)에서는 현지 여건상 발파공경을 89mm로 적용하고 있으며, 동해광산에서는 주변 환경을 고려하여 102mm와 89mm 공경을 선택하여 적용하고 있다. 신기광산은 모든 벤치에서 102mm 공경을 적용하고 있다. 폭약은 비중 0.8의 ANFO(Bulk)를 동일하게 사용하고 있다.

각 광산별 발파조건은 표 4와 같다. 공당장약량(Q_b)은 ANFO 비중과 공경 및 천공장과 전색장을 이용해서 산출되었다. 발파공 최하부에 장약되는 에멀전 폭약은 암석을 파쇄하기 위한 고밀도 하부장약이 아니라 ANFO를 기록시키기 위한 전폭약으로 이용되는 것이므로 공당장약량과 비장약량 산출에서 제외되었다. 암반조건과 착점오차 등으로 공간격(S)과 저항선(B)이 일정하게 유지되지 못하는 경우는 비장약량 산출시 공간격과 저항선의 평균값이 이용되었다.

1회 발파되는 발파공 수는 발파열 수에 따라서 10~20공 정도로 조절되었다. 뇌관은 20ms 간격의

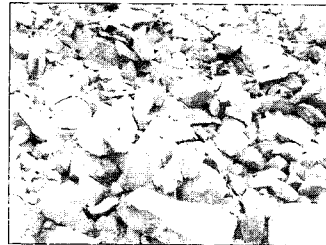
지연시차를 가진 동일 회사 제품의 전기식 뇌관이 모든 광산에서 동일하게 적용되고 있었으며, 진동으로 인한 주변 환경피해를 고려하여 각 지연시차당 1개 공만을 발파가 이루어졌다.

(5) 파쇄물의 입도 측정

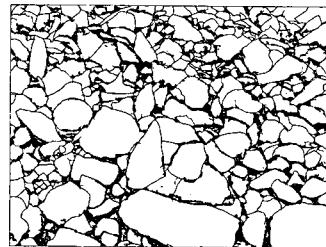
파쇄물의 입도분포를 측정하는 가장 정확한 방법은 체(Screen)를 이용해서 직접 측정하는 것이나 이 방법은 다양한 크기의 체를 설치할 수 없으며, 전체 파쇄물을 체가름 할 수 없는 등 적용에 한계가 있다. 이 연구에서는 현장 적용이 간편하고 빠른 시간에 다량의 자료를 처리할 수 있는 영상처리 기법(Image Processing)을 이용하였다

발파 후 파쇄물의 형상과 크기 분포를 고려하여 최소 3개 이상의 영상처리를 위한 사진을 얻었다. 이 때 각각의 사진은 파쇄물의 최대·중간·최소 크기를 대표할 수 있도록 선정되었다. 파쇄물의 입도 분석에는 Split-Desktop 프로그램을 이용하였다.

그림 4에는 조사현장에서 촬영된 파쇄물 사진과 이미지프로세싱을 통해서 파쇄물의 경계부가 추출된 결과를 보여주는 그림을 도시하였다.



(a) 파쇄물 사진



(b) 경계부를 추출한 결과

그림 4. 이미지프로세싱을 이용한 크기 분석

표 4. 광산별 발파조건

Bench	Geometry					Explosive Energy			
	H	B	S	L	D	Lt	Qb	q	N
Donghae Mine									
D11	13	3	3	11	102	4	71.9	0.61	32
D21	13	3	3	10	89	4	49.8	0.43	20
D22	18	2	4	16	89	4	79.6	0.55	10
D23	17	3	4	14	89	4	69.7	0.34	6
D24	12	3.5	4	9.4	102	4	61.4	0.37	11
D25	16.5	3.4	3.8	14.1	89	4	70.2	0.33	10
D26	10	3.5	3.2	7.4	102	4	48.4	0.43	13
D27	11	2.5	3.5	8.4	102	4	54.9	0.57	19
D31	14	3	4	13	102	4	85.0	0.51	20
D32	15	3	3.5	12.5	102	4	81.7	0.52	15
D33	15	3	3.5	12.5	102	4	81.7	0.52	19
D34	10	2.5	3.3	7.4	102	4	48.4	0.59	19
D35	15	3	4	12	102	4	78.4	0.44	20
D36	17	3	3	14	102	4	91.5	0.60	16
D37	15	2.7	3	12.5	102	4	81.7	0.67	11
Sinki Mine									
S11	13	3	3.5	10.5	102	4	68.6	0.50	20
S12	11	3.5	3.7	8.4	102	4	54.9	0.39	14
S13	14.5	3.5	3.1	12.0	102	4	78.4	0.50	17
S14	13	3.5	3.3	10.5	102	4	68.6	0.46	19
S15	12	3.0	3.5	9.4	102	4	61.5	0.49	16
S16	15	3.5	3.0	12.5	102	4	81.7	0.52	16
S21	15	3	3	12.5	102	4	81.7	0.61	10
S22	15	2.5	3.4	12.2	102	4	79.8	0.63	15
S23	11	3.1	3.3	9.5	102	4	62.1	0.55	14
Yeongwol Mine									
Y11	15.5	3.5	3.8	14	89	3	69.7	0.34	20
Y12	16.5	3.5	3.8	15	89	3	74.7	0.34	11
Y13	15.5	3.3	3.3	14.5	89	3	72.2	0.43	10
Y14	15	3.5	3.6	14.5	89	2.5	72.2	0.38	36
Y15	16	2.5	3.5	13	89	4	64.7	0.46	8
Y16	15.5	3.5	3.5	14.5	89	3	72.2	0.38	30
Y17	15	3.5	3.5	14	89	3	69.7	0.38	11

H : Bench Height(m); B : Burden(m); S : Spacing(m); L : Column Charge Length(m); D : Hole Diameter(mm); Lt : Temping Length(m); Qb : Charge weight per hole(kg); q : Powder factor(ANFO kg/m³); N : Number of holes

(6) 파쇄물의 입도 분포

파쇄물의 입도는 Rosin-Rammler 분포곡선을 이용하여 입도분포곡선을 작도하기 위한 파쇄물의 특징크기(Characteristic size; Xc)와 균등계수(Uniformity Index; n)를 평가하였으며, 평균크기(X₅₀)와 최대크기(Ts)도 평가하였다. 평가결과는 표 5에 요약되어있다.

측정 결과 중 동해광산 D3 측정자료에서 D35, D36, D37은 벤치내부에 공동이 존재함으로써 폭발

손실로 인해 발파가 적절히 이루어지지 않은 경우이다. 이 경우는 최대크기와 평균크기 등이 다른 자료들에 비해 지나치게 크게 나타났으며, 현장에서 허용되는 파쇄물의 최대 크기인 100cm를 초과하는 비율이 50~70%에 달하는 것으로 평가되었다. 표 5에서 D36 측정자료 중 ">300"는 조사된 파쇄물의 최대크기가 Split-Desktop 프로그램이 처리할 수 있는 한계를 벗어난 자료이다. 조사된 파쇄 입도 곡선을 그림 5에 광산별로 도시하였다.

표 5. 파쇄입도 측정 결과

Bench	X50(cm)	Ts(cm)	Xc(cm)	n
Donghae Mine				
D11	35.7	82.2	42.8	1.93
D21	42.5	100.1	51.5	2.24
D22	34.9	79.2	41.0	2.42
D23	65.4	174.1	82.7	1.76
D24	51.3	126.2	62.4	1.89
D25	50.3	133.4	63.6	1.62
D26	35.8	137.4	55.2	1.40
D27	59.3	158.4	74.6	1.82
D31	51.3	159.7	65.7	1.68
D32	36.8	78.6	43.4	2.23
D33	28.0	73.9	34.3	2.34
D34	60.0	144.4	71.8	2.15
D35	141.3	310.3	170.5	1.94
D36	152.1	> 300	188.2	1.96
D37	64.6	182.3	82.6	1.85
Sinki Mine				
S11	21.2	87.4	27.9	1.76
S12	36.9	102.5	44.4	1.94
S13	24.9	69.8	30.3	2.08
S14	23.5	68.5	29.2	2.10
S15	32.3	88.5	40.7	2.12
S16	50.8	163.2	72.2	1.49
S21	54.7	135.8	69.3	1.89
S22	18.1	55.3	23.9	1.76
S23	44.9	111.3	53.8	2.15
Yeongwol Mine				
Y11	41.2	131.0	51.3	1.95
Y12	24.2	66.7	30.0	1.97
Y13	20.6	63.8	26.1	1.90
Y14	34.6	92.5	42.1	2.05
Y15	20.2	60.3	25.0	2.00
Y16	19.5	53.3	23.9	2.09
Y17	33.5	118.8	47.0	1.62

X₅₀ : Mean fragment size(cm); Ts : Top Size(cm);
Xc : Characteristic size(cm); n : Uniformity index

3. 파쇄도에 영향을 미치는 요인 분석

3.1 상관성 분석

벤치발파시 발파로 인한 암석파쇄도에 영향을 미치는 요인을 분석하기 위해 현장조사에서 얻어진 결과를 바탕으로 기초적인 상관성 분석을 실시하였다. 상관성 분석은 전체 조사자료를 통합하여

실시하였으며, 동일 광산에서 구분되어 있는 채광 구역을 묶어서 광산단위로도 분석을 실시하였다.

(1) 공간격과 저항선

표 6에는 공간격이나 저항선과 관련이 있을 것으로 판단되는 파라미터들 간의 상관관계를 요약해 놓았다. 전체 조사자료에서 공간격과 저항선은 발파조건이나 GSI 같은 암반조건에 대해 상관성이 없는 것으로 분석되었으며, 공간격과 저항선간에도 상관성이 없는 것으로 나타났다.

이러한 이유는 대부분의 광산이 지질조건이나 암반상태에 관계없이 작업의 편리성을 위해 일정한 발파패턴을 유지하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

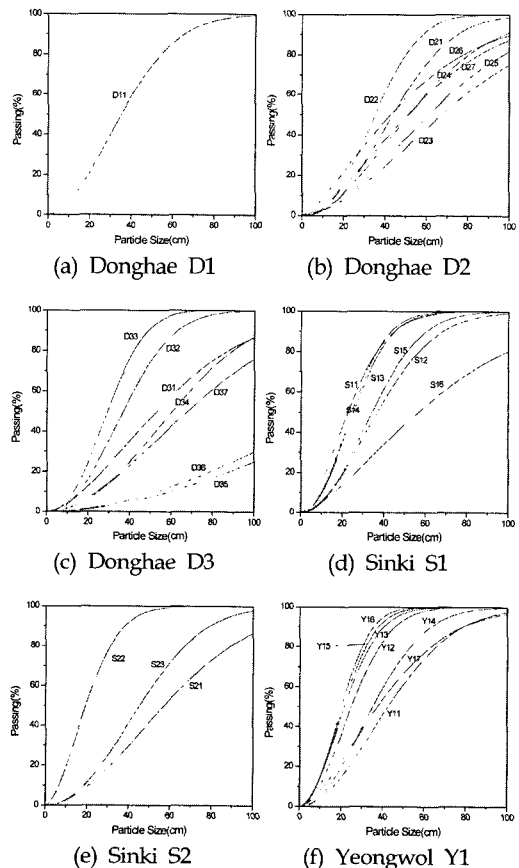


그림 5. 각 지역별 파쇄물의 입도분포 곡선

표 6. 공간격과 저항선에 대한 상관성 분석

	Total	Donghae	Sinki	Yeongwol
Bench Height & Burden	-0.06	-0.21	-0.19	-0.35
Bench Height & Spacing	0.33	0.56	-0.72	0.37
Burden & Spacing	-0.07	-0.07	-0.17	0.31
GSI & Burden	0.02	0.26	0	0.61
GSI & Spacing	0.04	-0.24	-0.62	0.68
Block Size & Burden	0.01	-0.08	-0.02	0.62
Block Size & Spacing	-0.01	0	-0.56	0.67

(2) 비장약량과 파쇄물의 평균크기(X_{50})

각 광산의 채광지역별로 파쇄물의 평균크기와 비장약량의 관계를 분석하였다. 자료수가 1개인 D1은 질리분포와 지질적 특성이 유사한 D2와 함께 분석되었다. 일반적으로 비장약량과 파쇄물의 평균크기는 반비례하는 것으로 알려져 있으나 (Langefors, 1963), 동해광산 D1, D2와 영월광산 (Y1) 및 신기광산의 일부를 제외한 나머지 지역에서는 특별한 관계를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 비장약량이 암석 파쇄도와 밀접한 관련이 있을 것이라는 일반적인 통념과 달리 비장약량은 각각의 발파공이 부담하는 암반의 체적에 대한 고려만 하고 있을 뿐, 기하학적인 문제는 고려하고 있지 않기 때문이다. 따라서 Langefors (1963)는 비장약량에 저항선을 함께 고려하는 도표를 제시한 바 있다.

한편 각 채광지역별로 비장약량과 파쇄물의 평균크기가 반비례 관계를 보이는 자료를 통합하여 그림 6에 도시하였다. 이 그래프에서 각 지역의 자료는 몇 개의 층으로 분리되어 나타나는 것을 볼 수 있는데, 그림 7의 Langefors(1963)에 의한 그래프와 형태적으로 유사하다. 그러나 그림 6에서 나타나는 자료의 계층화는 그림 7의 계층화 방식과

는 차이가 있다. 그림 7에서 자료의 계층화는 저항선 차이에 따라 발생하는 것으로 설명되고 있으나 그림 6에서는 저항선이 큰 쪽이 아래쪽에 배치되어 있으며, 저항선이 작은 쪽이 위쪽에 배치되어 있는 등 그림 7과는 상이한 결과를 나타낸다.

그림 6에서 측정결과들은 저항선이 아닌 광산 단위로 계층화가 이루어지고 있음을 알 수 있는데 가장 위쪽에는 동해광산의 자료들이 위치하며, 중간위치에는 신기광산의 자료들이 위치해 있고 가장 아래쪽에는 영월광산의 자료들이 위치해 있다. 이는 천공과 발파에 소요되는 비용이 영월광산이 가장 작으며, 발파효율도 가장 높게 얻어지고 있음을 가리킨다.

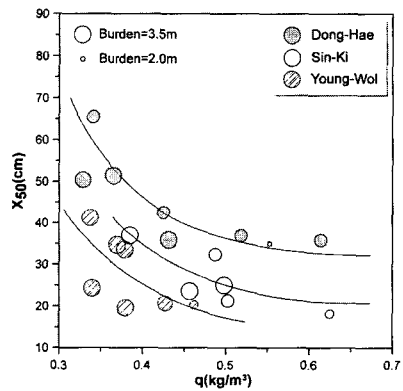


그림 6. 파쇄물의 평균크기와 비장약량의 관계

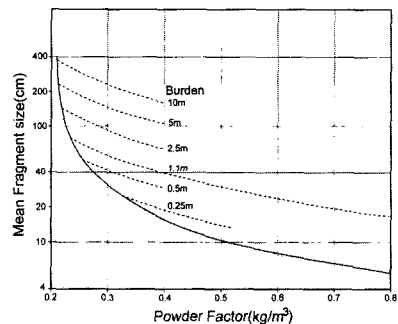


그림 7. 파쇄물의 평균크기와 비장약량의 관계 (Langefors(1963)에 의한)

이와 같은 비장약량과 파쇄물의 평균크기 관계는 저항선보다는 광산의 지질특성이나 기타 발파 조건이 발파로 인한 암석 파쇄도에 더 큰 영향을 미치고 있음을 암시한다.

(3) 파쇄물의 평균크기(X_{50})에 영향을 미치는 요인

상관성 분석결과 파쇄물의 평균크기는 현지암반의 블록크기와 가장 높은 상관성을 보이는 것으로 나타났다. 두 파라미터 간의 상관성은 동해광산에서 0.86으로 가장 높은 값을 나타내며, 영월광산에서 0.78로 가장 낮은 값을 보인다. 이밖에도 표 7에서 볼 수 있듯이 파쇄물의 평균크기는 GSI와 Jc (절리면 상태에 따른 점수)와도 비교적 높은 상관성을 보인다. 그러나 Jc는 동해광산에서는 다른 광산과 반대의 경향으로 나타나는 등 GSI나 블록크기에 비해 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 현지암반의 일축압축 강도는 개별광산에서 나타나는 상관성과 전체자료에서 나타나는 상관성이 반대의 경향을 보이는데, 이는 개별광산에서 조사된 일축압축강도 자료가 적기 때문이거나 일축압축강도가 다른 요인들에 비해 암석 파쇄도에 큰 영향을 주지 못하고 있음을 가리킨다.

표 7. 파쇄물의 평균크기와 암반 조건의 상관관계

	Total	Donghae	Sinki	Yeongwol
X50 & Block Size	0.75	0.86	0.87	0.78
X50 & GSI	0.60	0.51	0.81	0.58
X50 & Jc	0.36	-0.15	0.64	0.32
X50 & UCS	-0.51	0.14	0.28	-

GSI: Geological Strength Index; Jc: Joint condition coefficient; X50: Mean fragment size; UCS: Uniaxial compressive strength;

그림 8은 자연상태 암반의 블록크기에 대한 X_{50} 의 관계를 그래프로 표시한 것이다. 이 그림에서 원의 크기는 비장약량의 크기를 표시한 것으로써 가장 큰 원이 $q=0.63\text{kg/m}^3$, 가장 작은 원이 0.33kg/m^3 을 가리킨다. 암반의 블록크기와 X_{50} 의 관계를 직선으로 회귀분석한 그래프 상에는 비장

약량의 크기가 일정 크기 이상이 되는 자료들이 분포하며, 그래프 주변에 비장약량이 비교적 작은 자료들이 분포하는 특징을 보인다.

그림 8에서 S12, D24 및 D23 등은 블록크기에 비해 비장약량이 작아서 큰 파쇄물을 얻게 된 경우이다. 반면 회귀직선의 아래쪽에 위치하는 Y11, Y12, Y14, Y16 등은 비장약량이 작음에도 불구하고 작은 파쇄입도를 얻은 경우인데, 이는 파쇄물의 평균크기를 결정하는데 또 다른 요인이 작용하고 있음을 가리킨다.

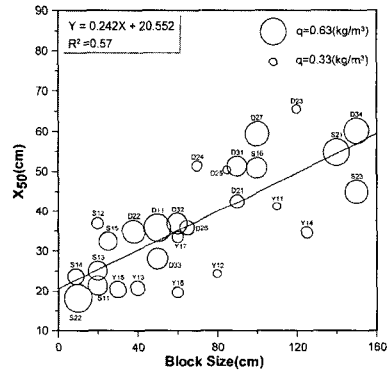


그림 8. 파쇄물의 평균크기와 자연상태 암반 블록크기와의 관계

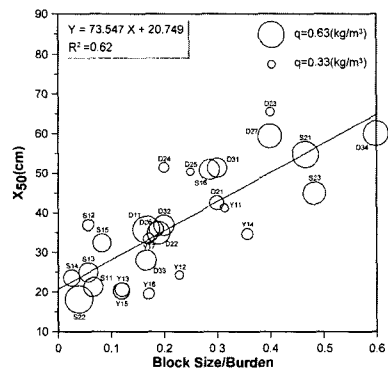


그림 9. 파쇄물의 평균크기와 암반 블록의 크기를 저항선으로 나눈 값의 관계

그림 9는 자연상태 암반의 블록크기를 저항선으로 나눈 값에 대해 X_{50} 을 도시한 그래프이다. 블록

크기를 저항선으로 나눈 것은 발파공과 자유면 사이에 몇 개의 절리 또는 몇 개의 블록이 있는가를 의미한다. 이 결과 블록크기 만으로는 회귀분석에서 $R^2=0.57$ 의 상관계수를 얻은 반면, 블록크기를 저항선으로 나눈 경우에는 $R^2=0.62$ 로써 보다 높은 상관계수를 얻을 수 있었다.

이상의 결과로부터 단순히 현지암반의 블록크기나 저항선 보다는 저항선과 결합된 형태의 블록크기, 즉 '발파공과 자유면 사이에 얼마나 많은 절리가 존재하는가' 또는 '얼마나 많은 블록이 있는가'에 따라 파쇄물의 크기가 결정된다고 볼 수 있다. 또는 현지암반은 자연상태에서 얼마나 파쇄되어 있으며, 이러한 파쇄상태에 대한 저항선 크기가 발파로 인한 암석의 파쇄입도에 가장 큰 영향을 미친다고 할 수 있다. 여기에 더해 주어진 조건에서 비장약량이 작으면 큰 파쇄입도를 얻게 된다고 할 수 있다

그림 10에는 Set-1에 속하는 절리군의 주향(조사된 절리의 Orientation Tensor로부터 구해진 첫 번째 Eigenvector 방향으로 결정됨)과 벤치면의 주향이 이루는 각도에 대해서 비장약량에 따른 파쇄물의 평균크기를 도시한 그림이다. 절리면과 벤치면이 이루는 각도 관계는 그림 11과 같다. 그림 10에서 자료가 분포하는 경향은 주절리군과 벤치면의 주향이 동일한 경우(0°)에 50cm 내외의 평균크기를 얻게되는 반면, 30° 에 가까워질수록 급격히 감소하는 경향을 보인다. 절리면과 벤치면의 방향 차이가 60° 를 지나면서 파쇄물의 평균크기는 다시 증가하는 양상을 보이는데 $0^\circ \sim 30^\circ$ 부근에서 감소되는 경향보다는 뚜렷하지는 않다. 이런 현상은 그림 12에 도시된 특정크기(X_c)와의 관계에서 더욱 뚜렷하게 나타난다.

X_c 는 절리면과 벤치면 주향이 이루는 각도가 0° 로부터 30° 에 가까워질수록 급격하게 감소하는 경향을 보인다. 이와 같이 절리면과 벤치면의 주향이 30° 내외를 이루는 경우에 암석의 파쇄도가 가장 양호하다는 결과는 Roy et al.(1996)에서도 찾을 수 있다. Roy et al.은 현장조사 결과 주절리면과 벤치면의 주향이 $25 \sim 65^\circ$ 를 이룰 때 파쇄도의 관점에

서 벤치방향으로 가장 적절하다고 지적한 바 있다.

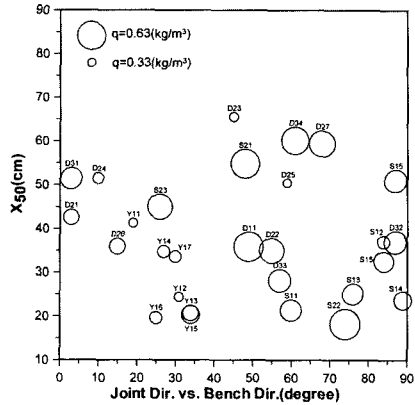


그림 10. 파쇄물의 평균크기와 절리방향과의 관계

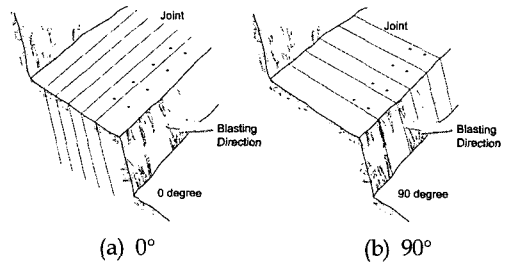


그림 11. 절리면과 벤치면이 이루는 각도 관계

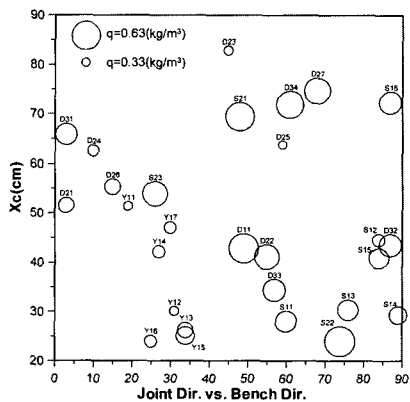


그림 12. 파쇄물의 특정크기와 절리방향과의 관계

이 같은 결과를 종합할 때 그림 8과 그림 9에서 회귀직선의 아래쪽에 분포하는 Y11, Y12, Y14,

Y16는 주절리의 방향에 대해 벤치면 방향을 적절히 선택함으로써 비장약량의 크기에 관계없이 작은 파쇄입도를 얻을 수 있었던 것으로 판단된다.

$$X_{50} = Fr \cdot q^{-0.8} \cdot Q_b^{1/6} \cdot \left(\frac{115}{S_{ANFO}} \right)^{19/30} \quad (1)$$

4. 고찰

4.1 파쇄물의 크기와 절리방향의 관계에 대한 고찰

절리의 주향과 벤치면의 주향이 유사한 경우에 파쇄물의 입도가 작아지는 현상은 절리면에 발파로 발생한 충격파가 간히는 현상 때문이다. Lande (1983)가 설명한 바와 같이 발파로 인해 발생한 충격파는 층과 층 또는 절리면 사이에서 Channel Wave의 형태로 전파하면서 층의 경계나 절리면을 따라 면에 수직한 방향으로 새로운 균열들을 발생시키게 되므로 더 많은 파쇄가 이루어진다. 그러나 이런 현상이 이론적으로는 절리와 벤치면의 주향이 동일한 경우에 가장 크게 발생할 수 있음에도 불구하고 그 차이가 30°정도인 경우에 가장 좋은 파쇄 상태를 나타내는 것은 전색위치의 암석 파쇄가 불량하기 때문이다. 절리와 벤치면의 주향이 동일한 경우에는 전색위치의 암석이 파쇄되지 못하고 벤치의 전면으로 전도되거나 낙하하는 현상이 발생하게 되므로 벤치면 상부의 암피가 클수록 더 큰 암피를 얻게 된다. 반면 절리와 벤치면이 30°정도를 이루게 되는 경우는 적절한 Channel Wave 효과를 얻을 수 있을 뿐 아니라 암반 블록의 움직임이 구속되기 때문에 충격파에 의한 파쇄와 가스압에 의한 비산이 충분히 이루어지게 되어 암석은 잘게 파쇄되는 것으로 보인다.

절리면 주향과 벤치면 주향이 90°를 이루는 경우는 절리면에 갇힌 Channel Wave가 자유면을 향해 방출되고, 이론적으로 절리면에 수직인 방향으로의 저항선이 무한대이므로 Channel Wave의 효과를 얻을 수 없다.

4.2 파쇄물의 평균크기 예측

벤치발파에서 파쇄물의 크기를 예측하는데 주로 이용되는 Kuz-Ram 모델의 Kuznetsov 식은 다음의 (1)식과 같다.

여기서 Fr : Rook Factor

q : 비장약량(kg/m³)

Q_b : 공당장약량(kg)

S_{ANFO} : 사용폭약의 ANFO 기준 상대 강도(국내생산 ANFO의 경우 S_{ANFO}=110)

이 식에서 Fr은 발파결과에 영향을 미치는 암반 조건을 고려한 것으로서 현지암반의 블록크기, 절리방향과 간격, 암석의 강도와 밀도에 따른 점수들의 합으로 결정된다. 그러나 앞서 언급했듯이 벤치 발파에서 암석 파쇄도는 몇 가지 요인들에 의해서 지배되는 특성을 보인다. 이 연구에서 조사된 지배적인 영향 요인들을 고려하면 (1)식은 다음과 같은 형태의 (2)식으로 대체될 수 있다.

$$X_{50} = (9.19k \cdot BS + 4.6)q^{-0.8}Q_b^{1/6} \left(\frac{115}{S_{ANFO}} \right)^{19/30} \quad (2)$$

X₅₀ : 파쇄물의 평균크기(cm)

k : 절리방향과 벤치면이 이루는 각도에 따른 함수(α : 절리주향과 벤치주향이 이루는 각도, degree)

$$k = 0.4 \cdot \sin 3(\alpha + 70^\circ) + 0.9$$

BS : 자연상태 암반 블록의 크기(m)

암석 파쇄도에 가장 큰 영향을 미치는 현지암반 조건은 자연상태 암반블록의 크기이며, 절리간격은 자연상태 암반 블록의 크기를 결정짓는 요소이므로 (2)식에서 별도로 고려되지 않았다. 또한 암석 파쇄도에 큰 영향을 미치지 못하며, 현장에서 쉽게 값을 구하기 어려운 암석강도와 밀도 등을 예측

식에서 제외시킴으로써 현장에서 보다 쉽게 적용할 수 있도록 하였다. 절리방향과 벤치면이 이루는 각도에 따른 함수(k)는 0.5~1.3 정도의 값을 가지며, 20~30° 부근에서 가장 작고, 70~80° 일 때 가장 큰 값을 갖는다.

5. 결 론

이 연구에서는 3개 석회석 광산에 대한 조사를 통해 벤치발파시 암석 파쇄도에 미치는 영향 요인들에 대해 조사되었다. 암석 파쇄도에 영향을 미치는 요인들은 여러 가지가 있으나, 자연상태 암반의 블록크기와 절리방향이 가장 지배적인 역할을 하는 것으로 밝혀졌다. 또한 이상의 조사 결과로부터 벤치발파시 암석 파쇄도를 예측하기 위한 식을 제안하였다.

참 고 문 헌

- Grenon, M., Hadjigeorgiou J. and Liu Qian, 1998, Quantifying in-situ rock block size and resulting fragment size distribution due to blasting, *International Journal of Blasting and Fragmentation*, Vol. 2, pp. 205-218.
- Lande, G., 1983, Influence of structural geology on controlled blasting in sedimentary rocks - case history, *First Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, Lulea, Sweden, Vol. 2, pp. 555-563.
- Langefors, U. and B. Kihlstrom, 1963, *The modern technique of rock blasting*, New York, Halstead Press.
- Mononen, S., 1999, Fragmentation in open pits. The Finnish Association of Mining and Metallurgical Engineers, Research Report A112, Espoo, 48p.
- Rustan, A., 1990, The importance of using joints to achieve scaled fragmentation in magnetite concrete used for sublevel blast models, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 35, No. 1/2/3, pp. 425-438.
- Roy, P.P., and B.B. Dhar, 1996, Fragmentation analyzing scale - A new tool for rock breakage assessment, *5th Int. Symp. on Rock Fragmentation by Blasting*, Balkema, p.448.